

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт дистанционного образования и профессионального развития

Кафедра «Энергетика»

Коканов Бауыржан Нургисаевич

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Исследование переходных процессов энергосистемы в аварийном режиме

Специальность 5В071800 – «Электроэнергетика»

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт дистанционного образования и профессионального развития

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

PhD, ассоц профессор

 Е.А.Сарсенбаев

«15» июня 2020 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование переходных процессов энергосистемы в аварийном режиме»

по специальности 5В071800 – «Электроэнергетика»

Выполнил: Коканов Б. Н.

Научный руководитель

PhD, ассистент - профессор

 Н.Е. Балгаев

«10» июнь 2020г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт дистанционного образования и профессионального развития

Кафедра «Энергетика»

Специальность 5В071800 – «Электроэнергетика»

УТВЕРЖАЮ

Заведующий кафедрой

PhD, ассоц профессор

 Е.А.Сарсенбаев

«27» октября 2019 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Коканов Бауыржан Нургисаевич

Тема: «Исследование переходных процессов энергосистемы в аварийном режиме».

Утверждена приказом ректора университета №345 - П от «24» октября 2019г.

Срок сдачи законченной работы «1» июня 2020 г.

Исходные данные к дипломной работе: Питание ЦРП/РУ осуществлено генераторной подстанцией ГТС-144 следующими данными: количество генераторов – 4; мощность каждого генератора – 34,13 МВт; $\cos\varphi = 0,8$; На ЦРП/РУ установлены два трёхобмоточных трансформатора с расщепленной обмоткой мощностью 100 МВА и напряжением 35/10/10 кВ. От ЦРП/РУ запитаны четыре нитки заводов КТЛ через четыре понижающих трансформаторов мощностью 50 МВА, напряжением 35/10.5 кВ. На шины заводов КТЛ-1 и КТЛ-2 подключены пять синхронных двигателей с мощностями 6400 кВт и 5400 кВт с $\cos\varphi = 0.87$. Расстояние от ГТС-144 до ЦРП – 1.3 км; от ЦРП до завода КТЛ-1 – 0.3 км и до завода КТЛ-2 – 0.88 км.

Перечень подлежащих разработке вопросов или краткое содержание дипломной работы:

- а) составление расчетной схемы;
- б) аналитический расчет 3-х фазного короткого замыкания;
- в) создание модели на основе рассчитанных параметров;
- г) сопоставление результатов аналитического расчета и моделирования.

Перечень графического материала: Графический материал подготовить в виде презентации

Рекомендуемая основная литература: 7 наименований.

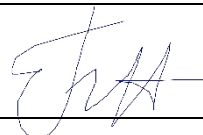
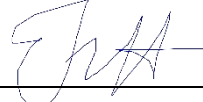

ГРАФИК

подготовки дипломной работы

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Составление расчетной схемы	21.02.2020г.	<i>Выполнено</i>
Аналитический расчет 3-х фазного короткого замыкания	27.03.2020г.	<i>Выполнено</i>
Создание модели на основе рассчитанных параметров	25.04.2020г.	<i>Выполнено</i>
Сопоставление результатов аналитического расчета и моделирования	25.05.2020г.	<i>Выполнено</i>

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Научный руководитель и консультанты	Дата подписания	Подпись
Аналитическая часть	Балгаев Н.Е., PhD, ассистент-профессор	25.05.2020г.	
Практическая часть	Балгаев Н.Е., PhD, ассистент-профессор	10.06.2020г.	
Нормаконтроль	А.О. Бердибеков, сениор-лектор	12.06.2020г.	

Научный руководитель  Балгаев Н.Е.

Задание принял к исполнению обучающийся  Коканов Б.Н.

(подпись)

Дата « 03 » февраля 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Выпускная работа на тему «Исследование переходных процессов энергосистемы в аварийном режиме» посвящена созданию модели ЭС для симуляции и анализа переходных процессов.

Построенная модель позволит ускоренно предоставлять перерасчеты изменяемых параметров элементов ЭС в режиме КЗ с возможностью графической визуализации. В ходе исследования, выполнен аналитический расчет электромагнитного переходного процесса, определены параметры элементов системы, на основе которых создана модель системы в программе MATLAB. В заключении работы сопоставляются результаты аналитических расчетов КЗ и результаты симулирования КЗ в модели системы. В качестве исследуемой ЭС рассмотрена схема ЭС на месторождении «Тенгиз», Атырауской области.

АНДАТПА

«Энергетикалық жүйенің апат режиміндегі өтпелі процестерін зерттеу» тақырыбындағы бітіру жұмысы өтпелі процесстерді симуляциялау және талдау үшін электр жүйенің моделін құруға арналған.

Құрылған модель қысқа тұйықталу режимінде электр жүйе элементтері параметрлерінің өзгеруін графикалық визуалдау мүмкіндігімен жылдам көру мүмкіндігін береді. Зерттеу барысында электромагниттік өтпелі процесс аналитикалық жолмен есептелген, жүйе элементтерінің параметрлері анықталып және олар негізінде MATLAB бағдарламасында жүйенің моделі құрылған. Жұмыстың соңында қысқа тұйықталуды аналитикалық есептеу нәтижелері және жүйенің моделінде симуляцияланған қысқа тұйықталу нәтижелері өзара салыстырылған. Жұмыста Атырау облысындағы «Тенгиз» кен орнындағы электр жүйенің схемасы қарастырылған.

ABSTRACT

The graduation thesis on the topic "Investigation of transients of an electrical grid under the short circuit fault condition" is devoted to designing a simulation model for analyzing the electrical transients.

The designed model will allow prompt recalculations of grid parameters under the short circuit fault with the possibility of graphical visualization as per system changes. During the study, the analytical part of hand calculation to define electromagnetic transients were conducted and the parameters of each system elements determined, based on which the simulation model of a power grid system was created in MATLAB software. In the conclusion of the work, the results of analytical short-circuit calculations and short-circuit simulation results in the designed model are compared. For investigation analysis, an existing power grid system in the Tengiz deposit of Atyrau Region is considered.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Обзор объекта исследования	7
2 Определение параметров расчетной схемы	8
2.1 Исходные данные параметров ТГТЭС-1, ЦРП, КТЛ-1 и КТЛ2	8
2.2 Существующая однолинейная схема объекта	9
2.3 Режимы работы сети	10
2.4 Построение расчетной схемы замещения	10
2.5 Расчет параметров схемы замещения	12
3 Определение тока КЗ	20
4 Создание модели в MATLAB	22
4.1 Приведение паспортных данных подсистем в модели MATLAB Simulink требуемой для расчетов. Краткое описание блоков модели Simulink	23
4.2 Симулирование аварийного режима и графическое воспроизведение амплитудных значений	26
5 Сопоставление результатов данных аналитического расчета с данными модели. Приведение погрешности	29
Заключение	30
Перечень принятых сокращений, терминов	31
Список использованной литературы	32
Приложения	33

ВВЕДЕНИЕ

Цель и задачи работы. Цель работы заключается в создании модели ЭС для исследования переходных процессов в аварийных режимах.

Для построения модели ЭС необходимо:

- 1) определить параметры схем замещения линий передач, установленных на системных подстанциях;
- 2) составить расчётную однолинейную схему замещения сети; определить напряжения в узловых точках и ступенях;
- 3) представить результаты расчетов совместно в процессе упрощения на картах режима (схемы замещения); рассчитать и определить 3-х фазные токи КЗ.
- 4) определить ступени сети, их базовые мощности напряжения в точных именованных единицах и в процентах к суммарной мощности нагрузок;
- 5) разработать модель ЭС в Simulink MATLAB;
- 6) внести установившегося данные режима сети на Simulink MATLAB;
- 7) произвести расчёт установившегося режима в MATLAB, используя расчетные параметры произведенного на основе вычисления токов КЗ;
- 8) результаты расчёта сопоставить с картой режима, сравнить с результатами, полученными аналитически.

Объектом исследования служит одна из существующих оперативных энергосистем ТШО ТГТЭС-1(Участок 1) на месторождении Тенгиз, Атырусской области.

Предметом исследования является анализ и расчет сверхпереходных токов короткого замыкания в разных режимах по доступным имеющимся параметрам как отдельного участка в следующем порядке от ТГТС1 на ОРУ ЦРП и до КТЛ с исключением подпитки сетей от ПБР, далее КЕГОК. На базе расчета будут разработаны компьютерные модели в MATLAB, на основе которых будут произведены анализ результатов и сопоставлены погрешности.

На защиту выносятся методический анализ и сравнения результатов, совокупность которых дает формирование показателей в относительной точности модели в дальнейшем ее применении.

1 Обзор объекта исследования

Объектом исследования является ЭС на месторождении «Тенгиз», Атырауской области. Номинальные мощности генераторов электростанции приведены в таблице 1.1, а схема подключения ЭС к внешней системе показан на рисунке 1.1.

Таблица 1.1 – Допустимая номинальная реактивная мощность генераторов ТШО

Генератор	Номинальная мощность (МВт)	Номинальный коэффициент мощности	Номинальная полная мощность (МВА)	Максимальная управляемая мощность МВА (85% от максимума)	Максимальная допустимая реактивная мощность ² (МВАр)
ТГ-6.1	34,13	0,8	42,7	31,25 ¹	18,75
ТГ-6.2	34,13	0,8	42,7	31,25 ¹	18,75
ТГ-6.3	34,13	0,8	42,7	31,25 ¹	18,75
ТГ-6.4	34,13	0,8	42,7	31,25 ¹	18,75

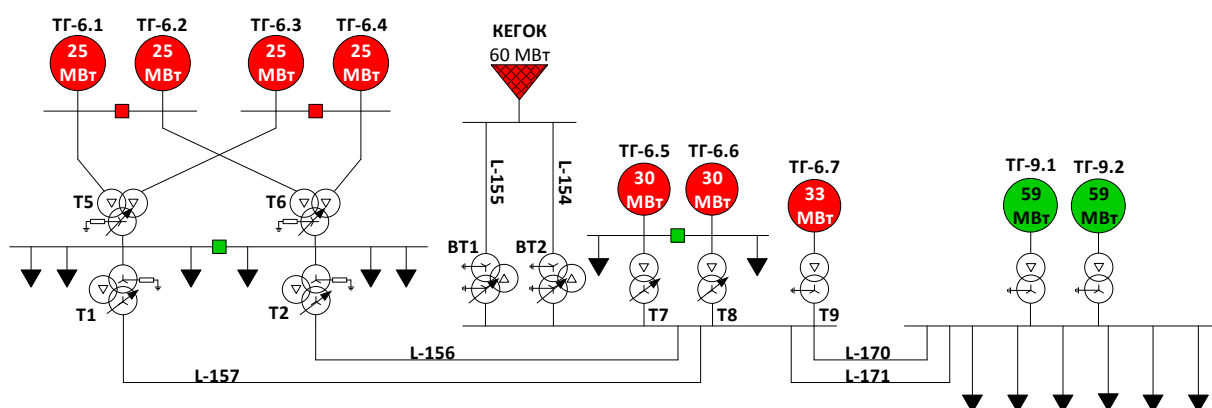


Рисунок 1.1 – Существующая энергосистема ТШО, Тенгиз, Казахстан

Когда все четыре турбины ГТЭС-1 находятся в работе, общая нештатная выработанная мощность составляет 100 МВт, а пиковая нагрузка системы достигает ~130 МВт при ожидаемой нормальной нагрузке ~ 120 МВт.

Данная электрическая система была построена одной из первых для веток КТЛ-1 и КТЛ2 15-20 лет назад. Расчёты КЗ согласно схемам, не соответствуют действительности на сегодня так как потребляемая мощность возросла. На сегодня участок получает дополнительную мощность.

2 Определение параметров расчетной схемы

2.1 Исходные данные параметров ТГТЭС-1, ЦРП, КТЛ-1 и КТЛ2

Исходные данные ЭС приведены в таблицах 2.1-2.5.

Таблица 2.1 – Параметры генераторов

Обозначение на схеме	Марка	S, МВА	U, кВ	cos Φ	P, кВт	Сопротивление, %		
						Xd''	Xd'	Xd
Г1	TG-6.1	42.663	10,5	0.8	34.13	14.1	19.6	217.7
Г2	TG-6.2	42.663	10,5	0.8	34.13	14.1	19.6	217.7
Г3	TG-6.3	42.663	10,5	0.8	34.13	14.1	19.6	217.7
Г4	TG-6.4	42.663	10,5	0.8	34.13	14.1	19.6	217.7

Таблица 2.2 – Параметры трансформаторов

Обозначение на схеме	Тип	МВА	Напряжение обмоток, кВ			Uк, %		
			ВН	СН1	НН	В-С	В-Н	С-Н
T1, T2	-	100	35	10	10	34.59	34.61	60.76
T3	-	50	35	-	10.5	-	13.09	-
T4	-	50	35	-	10.5	-	12.97	-
T5	-	50	35	-	10.5	-	13.12	-
T6	-	50	35	-	10.5	-	13	-

Таблица 2.3 – Параметры нагрузок

Обозначение на схеме	Тип СД	Мощность,	U, кВ	cos Φ	Сопротивление, %		
		P, МВт			Xd''	Xd'	Xd
H1	K1-MGC-701.1A	5.4	10	0.87	14.22	22.8	183
H2	K1-MGC-701.1B	5.4	10	0.87	14.22	22.8	183
H3	K1-MGC-740.1	6.4	10	0.87	16.8	26.6	215
H4	K2-MGC-701.1	5.4	10	0.87	14.22	22.8	183
H5	K2-MGC-720.1	6.4	10	0.87	16.8	26.6	215

Таблица 2.4 – Параметры реакторов

Обозначение на схеме	Характеристики		
	S, МВА	X	X ₀
Реактор 1	45	0,4549	-
Реактор 2	45	0,4549	-

Таблица 2.5 – Параметры линий электропередач

Обозначение на схеме	Длина линии, км	Марка провода, X34	Удельное сопротивление, Ом/км
W1, W2, W3, W4	0.05	NA	0.08
W5, W6	1.3	NA	0.08
W7, W8, W9, W10	0.2	NA	0.08
W11, W12	0.3	NA	0.08
W13, W14	0.88	NA	0.08

2.2 Существующая однолинейная схема объекта

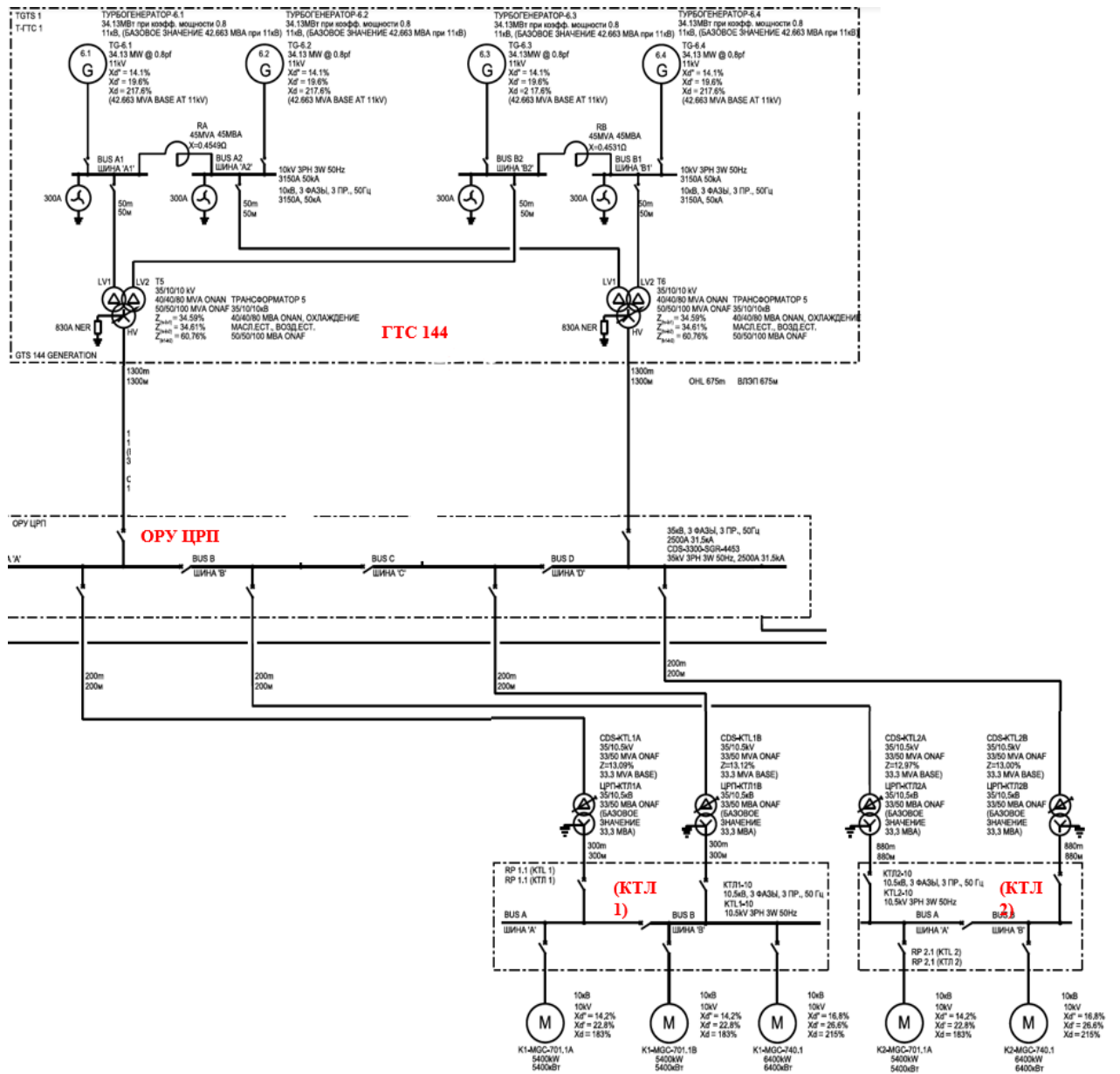


Рисунок 2.1 – Однолинейная схема ТГТЭС-1

2.3 Режимы работы сети

Основными режимами работы сети считают максимальный, когда в работе находятся все элементы энергосистемы, и минимальный, когда часть генераторов и минимальный, когда часть генераторов и линий отключены при минимальном режиме работы смежной системы.

Режимы работы для выбора у ставок и проверки чувствительности защит рассматриваются особо для каждой защиты элемента сети и каждого вида короткого замыкания.

В тех случаях, когда объем отключенных элементов не задан, можно принимать отключенными примерно половину генераторов и соответственно повышающих трансформаторов на электростанциях, а в энергосистемах увеличивать в 1,5 – 2 раза их сопротивление.

В данной ЭС (рисунок 1) минимальный режим будет достигаться следующим образом

Минимум в системе достигается увеличением сопротивления системы в 1,3-2 раза

$$X_{C_{\min}} = 1,5 \cdot X_{C_{\max}}$$

Минимум на станции достигается отключением половины генераторов в ЭС. Здесь будет отключен генератор G1.

Минимум в сети достигается отключением одной цепи двухцепных ВЛ или размыканием замкнутой цепи в конце следующего участка (линии). Здесь будут разомкнуты одна из параллельных линий W1, W6 и кольцо линиями W4 и W5.

2.4 Построение схемы замещения электрической системы

Для аналитического расчета переходных процессов при коротком замыкании нужно построить схему замещения на основе расчетной схемы. В качестве расчетной схемы используем однолинейную схему ТГТЭС-1, приведенного на рисунке 2.1. Каждый элемент ЭС вносится в схему замещения соответствующим элементом электрической схемы. Схема замещения ЭС приведена на рисунке 2.2.

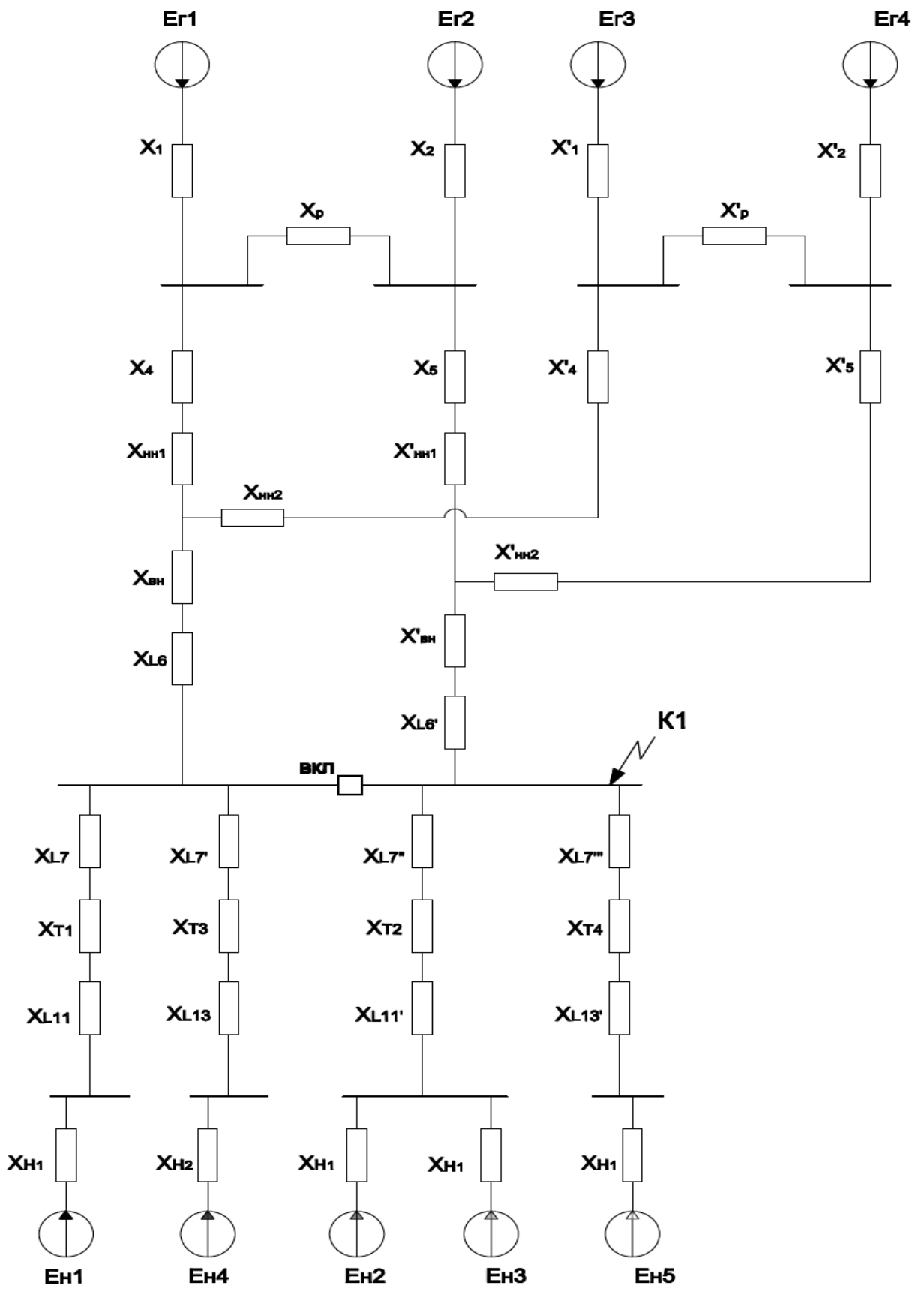


Рисунок 2.2 – Схема замещения ЭС

2.5 Расчет параметров схемы замещения

Расчет параметров схемы замещения ведется в относительных единицах с точным приведением параметров.

Задаем базисные величины. За базисную мощность примем $S_6 = 100$ МВА. Базисные напряжения на ступенях:

напряжение основной ступени: $U_{62} = 37$ кВ;

напряжения на ступенях генераторов и нагрузок:

$$U_{61} = U_{62} \frac{1}{k_{t1}} = 37 \frac{10}{35} = 10.6 \text{ кВ};$$

$$U_{63} = U_{62} \frac{1}{k_{t2}} = 37 \frac{10.5}{35} = 11.1 \text{ кВ};$$

где $k_{t1} = \frac{10}{35}$; $k_{t2} = \frac{35}{10}$ – коэффициенты трансформации трансформаторов.

Базисный ток на ступени КЗ: $I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1.56 \text{ кА}$

Генераторы G_1, G_2, G_3, G_4 ; $x_1 = x_2 = x'_1 = x'_2$; $x_{\text{нн1}} = x'_{\text{нн1}}$; $x_{\text{нн2}} = x'_{\text{нн2}}$; $x_4 = x_5 = x'_4 = x'_5$; $x_{\text{вн}} = x'_{\text{вн}}$ имеют одинаковые характеристики, а значит узлы E_{G1}, E_{G2} и E_{G3}, E_{G4} схемы замещения имеют одинаковые потенциалы. Соответственно сопротивление реакторов x_p и x'_p можно исключить из схемы замещения как включенное между узлами одинаковых потенциалов, поскольку при КЗ в точке К1 ток через него протекать не будет.

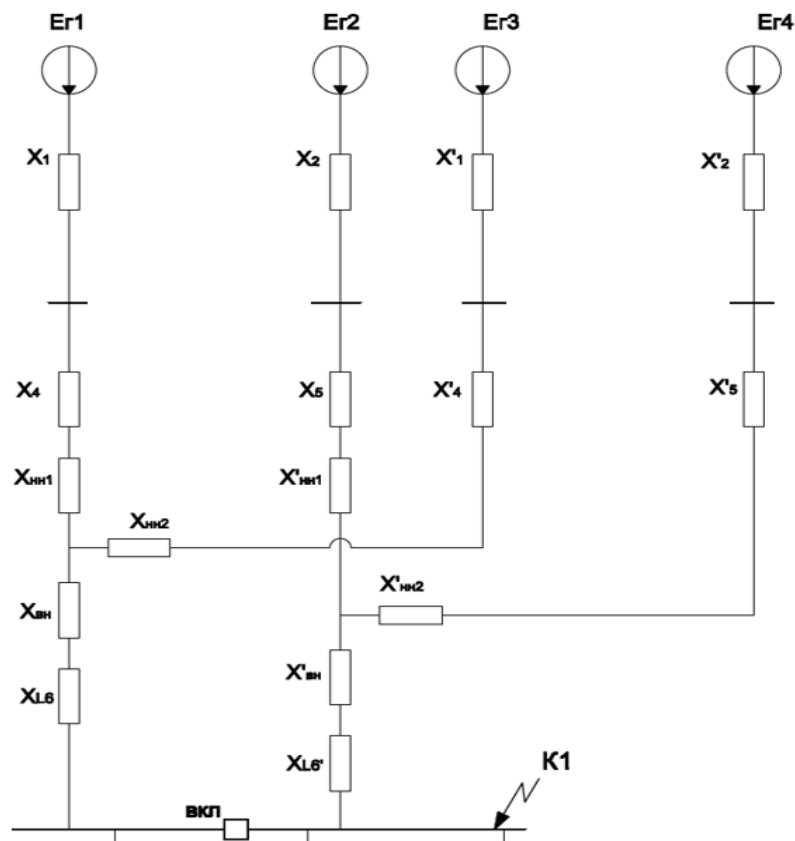


Рисунок 2.3 – Схема замещения ЭС от станции до шин

Рассчитаем ветвь Г1 и Г3 II Г2 и Г3.

Относительные величины сопротивлений для ветви с ЭДС E_{G1} и E_{G3} в эквивалентной схеме замещения:

$$x_1 = x'_1 = x_2 = x'_2 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{61}} \right) = 0.141 \cdot \frac{100}{42.663} \cdot \frac{11^2}{10.6^2} = 0.35$$

$$x_4 = x'_4 = x_5 = x'_5 = x_0 l \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = 0.08 \cdot 0.05 \cdot \frac{100}{10.6^2} \approx 0.0036 \text{ (кабель)}$$

$$x_6 = x'_6 = x_7 = x'_7 = x_1 + x_4 = 0.356 + 0.0036 = 0.36$$

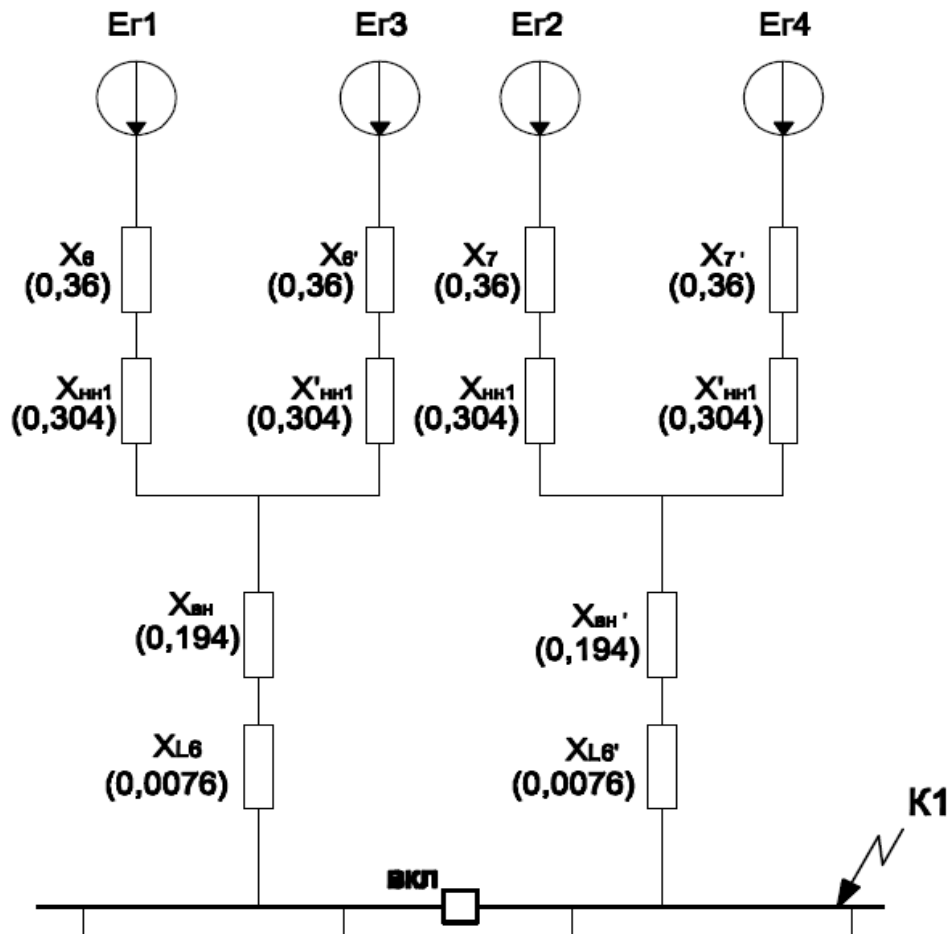


Рисунок 2.4 – Схема замещения ЭС после преобразования

Находим сопротивления трансформаторов с расщепленной обмоткой Т-1 и Т2 $Z_{\text{ВН-НН1}} = 34.59\%$; $Z_{\text{ВН-НН2}} = 34.61\%$; $Z_{\text{НН1-НН2}} = 60.76\%$

$$U_{\text{СВ}} = 0,5(34,60+34,6-60,76)=4,22\%$$

$$U_{\text{СН}} = 60.76-4.22= 56.54\%$$

$$x_{\text{НН1}} = x'_{\text{НН1}} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{4.22}{100} \cdot \frac{100}{100} = 0.0422$$

$$x_{\text{НН1}} = x'_{\text{НН1}} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{56.54}{100} \cdot \frac{100}{100} = 0.565$$

Сложим параллельно эквивалентные ветви генераторов G_1 и G_3 , а так же G_2 и G_4 :

$$S_{1,3} = S_1 + S_3 = 42.663 + 42.663 = 85.33 \text{ МВА}; \quad S_{1,3} = S_{2,4} = 85.33 \text{ МВА}$$

Суммируем сопротивления ветвей согласно схеме (рис. 2.5, а и б).

$$x_8 = x'_8 = x_6 + x_{\text{НН}} = 0.36 + 0.042 = 0.402$$

$$x_8 = x'_8 = x_9 = x'_9 = 0.402$$

$$x_{L6} = x'_{L6} = x_0 l \cdot \frac{S_6}{U_{62}^2} = 0.08 \cdot 1.3 \cdot \frac{100}{37^2} = 0.0076$$

Суммируем сопротивления ветви высокой стороны напряжения Т1 и Т2 аналогично и приводим эквивалентные значения для ветвей Ег1//Ег3 и Ег2//Ег4 соответственно:

$$x_{10} = x'_{10} = x_{\text{ВН}} + x_{L6} = 0.565 + 0.0076 = 0.573$$

$$x_{\text{ЭКВ}(G1,G3)} = x_{\text{ЭКВ}(G2,G4)} = \frac{x_8}{2} + x_{10} = \frac{0.402}{2} + 0.573 = 0.774$$

Рассчитаем схему замещения со стороны нагрузки. Рассмотрим нагрузки от ОРУ ЦРП до КТЛ 1 и КТЛ 2. Суммируем все сопротивления кабельной ЛЭП при условии включенного секционного выключателя шин ЦРП сопротивление (рис. 2.6):

$$x_{L7} = x_{L7}' = x_{L7}'' = x_{L7}''' = x_0 l \cdot \frac{S_6}{U_{62}^2} = 0.08 \cdot 0.2 \cdot \frac{100}{37^2} = 0.002 \text{ (кабель ЦРП – Т3-6)}$$

$$x_{L11} = x_{L11}' = x_0 l \cdot \frac{S_6}{U_{63}^2} = 0.08 \cdot 0.3 \cdot \frac{100}{11.1^2} = 0.019 \text{ (кабель Т3-4 - КТЛ-1)}$$

$$x_{L13} = x_{L13}' = x_0 l \cdot \frac{S_6}{U_{63}^2} = 0.08 \cdot 0.88 \cdot \frac{100}{11.1^2} = 0.057 \text{ (кабель Т5-6 - КТЛ-2)}$$

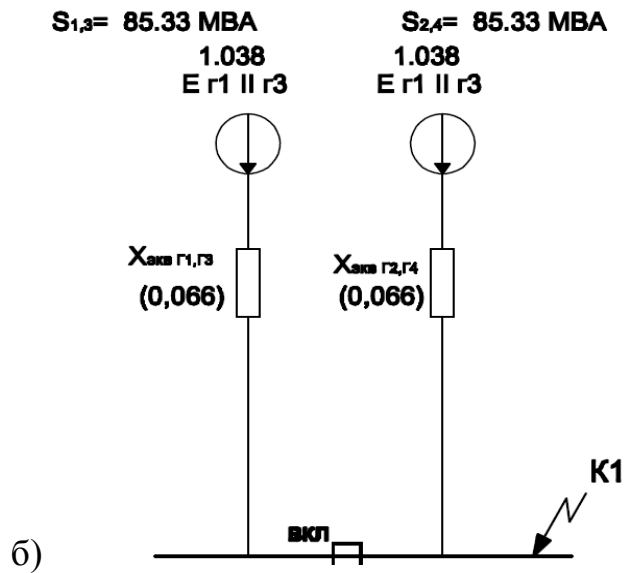
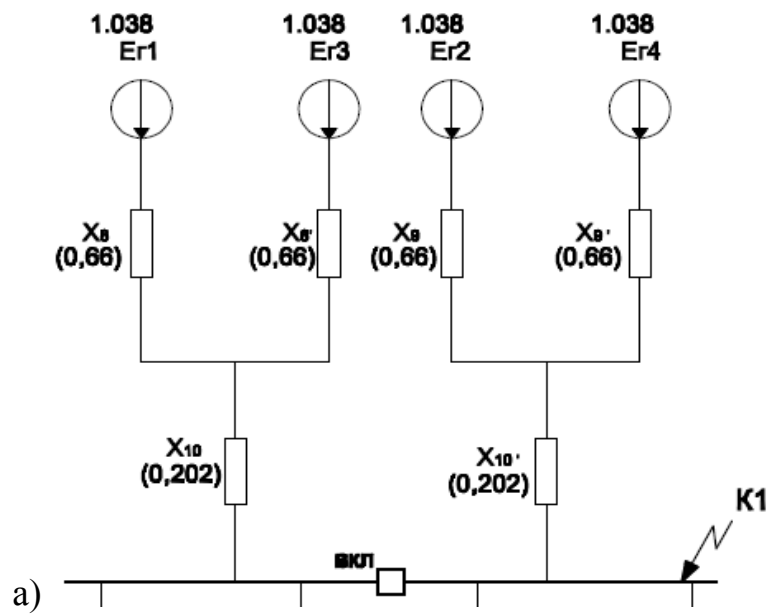


Рисунок 2.5

Сопротивления Т3, Т4, Т5, Т6:

$$x_{T1} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} \cdot \frac{U_H^2}{U_{63}^2} = \frac{13.09}{100} \cdot \frac{100}{50} \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 0.234$$

$$x_{T2} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} \cdot \frac{U_H^2}{U_{63}^2} = \frac{12.97}{100} \cdot \frac{100}{50} \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 0.232$$

$$x_{T3} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} \cdot \frac{U_H^2}{U_{63}^2} = \frac{13.12}{100} \cdot \frac{100}{50} \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 0.235$$

$$x_{T4} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} \cdot \frac{U_H^2}{U_{63}^2} = \frac{13.00}{100} \cdot \frac{100}{50} \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 0.233$$

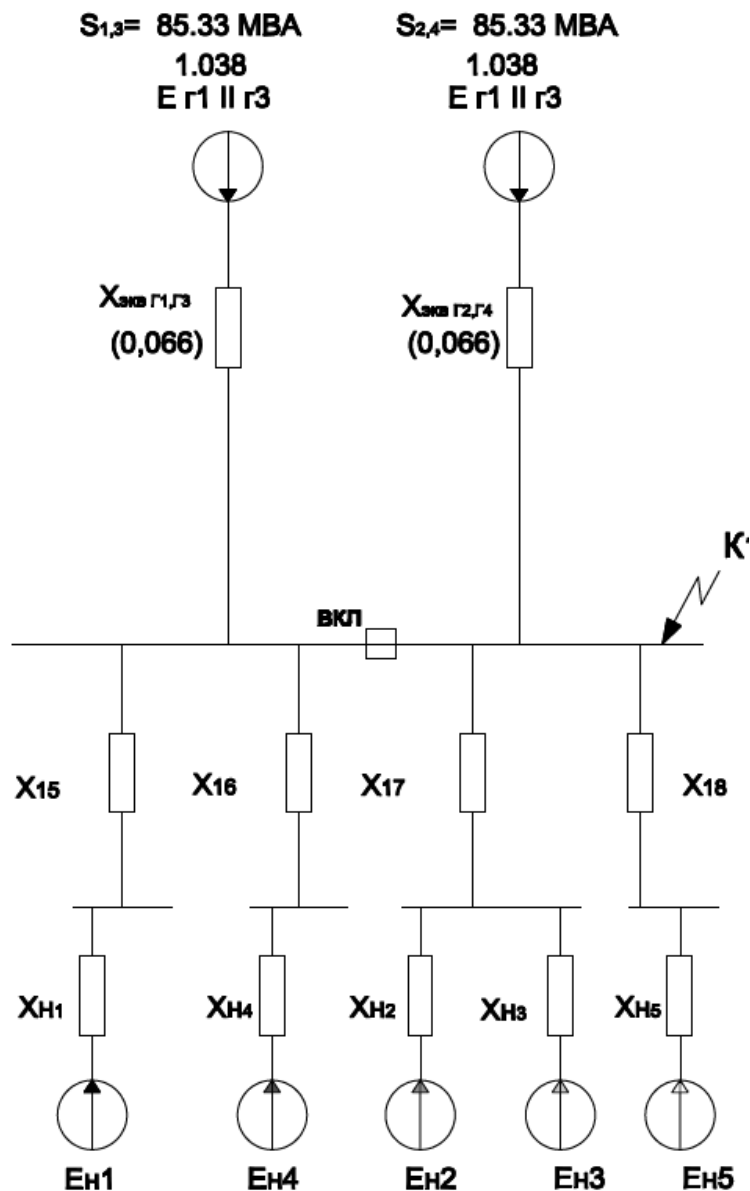


Рисунок 2.6

Суммируем сопротивления до шин потребителя:

$$x_{15} = x_{L7} + x_{T1} + x_{L11} = 0.002 + 0.234 + 0.019 = 0.255$$

$$x_{16} = x_{L7}' + x_{T3} + x_{L13} = 0.002 + 0.235 + 0.057 = 0.294$$

$$x_{17} = x_{L7}'' + x_{T2} + x_{L11}' = 0.002 + 0.232 + 0.019 = 0.253$$

$$x_{18} = x_{L7}''' + x_{T4} + x_{L13}' = 0.002 + 0.233 + 0.057 = 0.292$$

$x_H = x_{d \text{ ном}}'' \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ном}}}$ принимаем для всех СД $\cos \theta = 0.87$ (согласно данным проекта). Тогда,

$$x_H = x''_{d \text{ ном}} \cdot \frac{S_6}{P_{\text{ном}}} \cdot \cos\theta \cdot \frac{U_H^2}{U_{63}^2}$$

Приводим значения x по нагрузкам СД (заводы КТЛ):

$$x_{H1} = 0.142 \cdot \frac{100}{5.4} \cdot 0.87 \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 2.047$$

$$x_{H4} = 0.142 \cdot \frac{100}{5.4} \cdot 0.87 \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 2.047$$

$$x_{H2} = 0.142 \cdot \frac{100}{5.4} \cdot 0.87 \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 2.047$$

$$x_{H3} = 0.168 \cdot \frac{100}{6.4} \cdot 0.87 \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 2.42$$

$$x_{H5} = 0.168 \cdot \frac{100}{6.4} \cdot 0.87 \cdot \frac{10.5^2}{11.1^2} = 2.42$$

Упрощаем сопротивления нагрузок приводя по отдельным ветвям (рис. 2.7):

$$x_{19} = x_{H1} + x_{15} = 2.047 + 0.255 = 2.33$$

$$x_{20} = x_{H4} + x_{16} = 2.047 + 0.294 = 2.37$$

$$x_{21} = \frac{x_{H2} \cdot x_{H3}}{x_{H2} + x_{H3}} + x_{17} = 1.11 + 0.253 = 1.363$$

$$x_{22} = x_{H5} + x_{18} = 2.42 + 0.292 = 2.712$$

Приводим мощности идентичных СД:

$$S_{H1,H2,H4} = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{5.4}{0.87} = 6.2 \text{ МВА}$$

$$S_{H3,H5} = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{6.4}{0.87} = 7.35 \text{ МВА}$$

$$I_{*H1} = \frac{S_{H1}}{\sqrt{3} U_H} = \frac{6.2}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 0.34 \text{ кА}; \quad I_{*H1} = I_{*H2} = I_{*H4} = 0.34 \text{ кА}$$

Рассчитаем ЭДС ветви генераторов и СД(нагрузка). Так как напряжение потенциалов идентично, уравниваем ЭДС генераторов и нагрузки:

$$E_{G1} = E_{G2} = E_{G3} = E_{G4} = \frac{E_{1,2,3,4}}{U_{61}} = \frac{11}{10.6} = 1.038$$

$$E_{H1} = E_{H2} = E_{H3} = E_{H4} = E_{H5} = \frac{E_{1,2,3,4,5}}{U_{61}} = \frac{10}{10.6} = 0.94$$

Проверим значение эквивалентные выражение ЭДС:

$$E_{\text{ЭКВ}_{H2 \parallel H3}} = \frac{E_{H2} \cdot x_{H3} + E_{H3} \cdot x_{H2}}{x_{H2} + x_{H3}} = \frac{0.94 \cdot 25.55 + 0.94 \cdot 25.77}{25.77 + 25.55} = 0.94$$

$$E_{\text{ЭКВ}_{(H1,H4, H2 \parallel H3)}} = x_{\text{ЭКВ}_{(19,20,21)}} \left(\frac{E_{H1}}{x_{19}} + \frac{E_{H4}}{x_{20}} + \frac{E_{H2,H3}}{x_{21}} \right) = 0.63 \cdot \left(\frac{0.94}{2.33} + \frac{0.94}{2.37} + \frac{0.94}{1.363} \right) = 0.939 \approx 0.94$$

$$E_{\text{ЭКВ Н}} = E_{\text{ЭКВ Н2 и Н3}} = E_{\text{ЭКВ Н1, Н4, и Н2 || Н3}} = 0.94$$

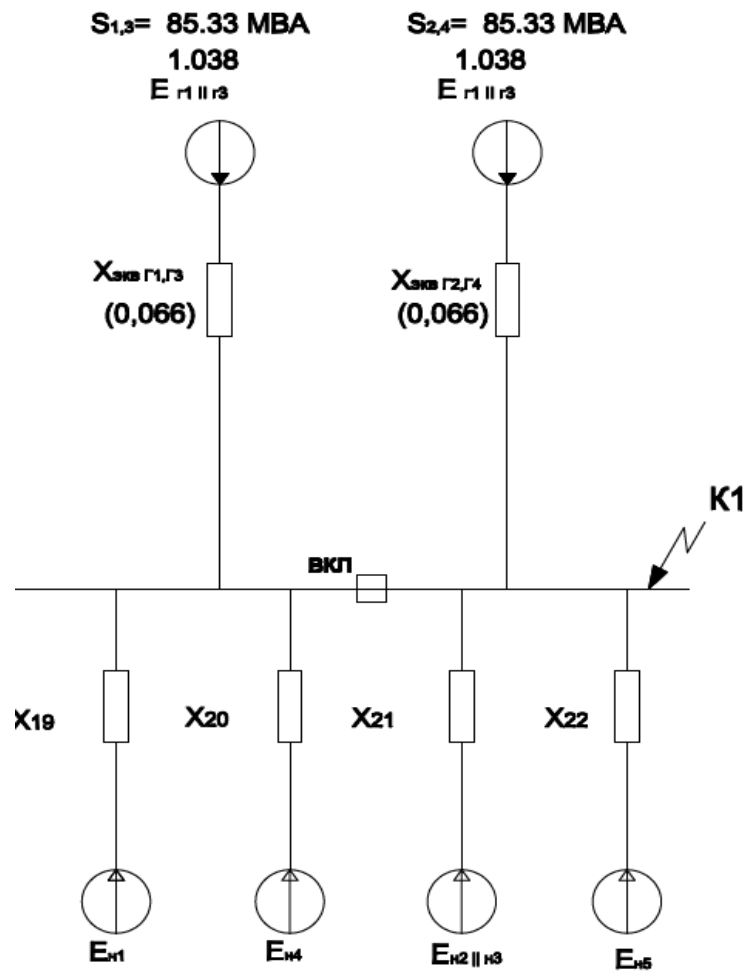


Рисунок 2.7

Суммарное сопротивление ветки нагрузки:

$$x_{\text{ЭКВ}(19,20,21)} = \frac{x_{19} \cdot x_{20} \cdot x_{21}}{x_{19} \cdot x_{20} + x_{19} \cdot x_{21} + x_{20} \cdot x_{21}} = \frac{2.33 \cdot 2.37 \cdot 1.363}{2.33 \cdot 2.37 + 2.33 \cdot 1.363 + 2.37 \cdot 1.363} \approx 0.63$$

$$x_{\text{ЭКВ 5}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}(19,20,21)} \cdot x_{22}}{x_{\text{ЭКВ}(19,20,21)} + x_{22}} = \frac{0.63 \cdot 2.712}{0.63 + 2.712} \approx 0.511$$

$$x_{\text{ЭКВ6}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}(G1,G3)}}{2} = \frac{0.774}{2} = 0.387$$

$$E_{\text{ЭКВ Г}} = \frac{E_{1,2,3,4}}{U_{61}} = \frac{11}{10.6} = 1.038$$

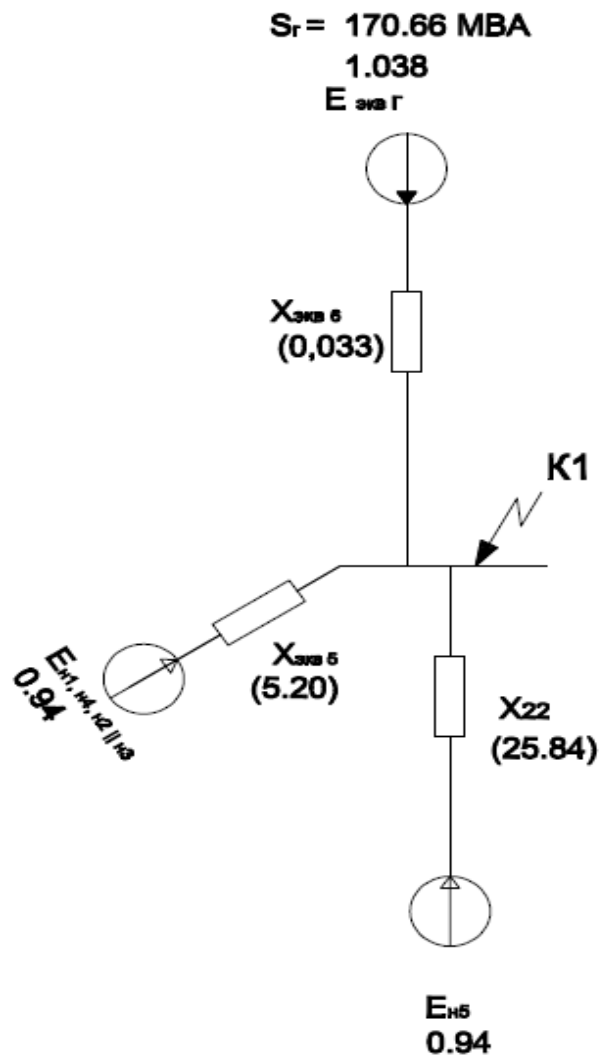


Рисунок 2.8

3 Определение тока КЗ

Периодическая составляющая токов КЗ для каждого из лучей I_* (рис. 3.1):

$$I''_{*1} = \frac{E_{\text{ЭКВ}6}}{x_{\text{ЭКВ}6}} = \frac{1.038}{0.387} \approx 2,682$$

$$I''_{*2} = \frac{0.94}{0.511} \approx 1.839$$

Переводим значения в именованные единицы:

$$I''_1 = I''_{*2} \cdot I_6 = 2,682 \cdot 1.56 = 4,184 \text{ кА}$$

$$I''_2 = I''_{*1} \cdot I_6 = 1.839 \cdot 1.56 = 2.868 \text{ кА}$$

Короткое замыкание в точке КЗ 1 (рис.3.2):

$$I_{\text{КЗ}1} = I''_1 + I''_2 = 4,182 + 1,839 = 6,023 \text{ кА}$$

$$x_{\Sigma} = \frac{x_5 \cdot x_6}{x_5 + x_6} = \frac{0.033 \cdot 5.20}{0.033 + 5.20} = 0.22$$

$$y = \frac{1}{x_a}$$

$$y_1 = \frac{1}{x_{\text{ЭКВ}6}} = \frac{1}{0.387} = 2.58$$

$$y_2 = \frac{1}{x_{\text{ЭКВ}5}} = \frac{1}{0.511} = 1.95$$

$$E_3'' = \frac{E_{\text{ЭКВ}Г} \cdot y_2 + E_{\text{ЭКВ}Н} \cdot y_1}{y_1 + y_2} = \frac{1.038 \cdot 1.95 + 0.94 \cdot 2.58}{2.58 + 1.95} = 0.98$$

I''' - сверхпереходный ток (кА):

$$I''' = \frac{E_3''}{x_{\Sigma}} = \frac{0.98}{0.22} = 4.454 * 1.56 = 6.949 \text{ кА}$$

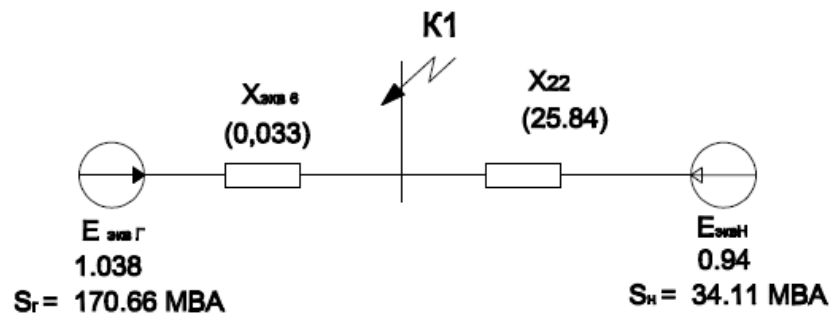


Рисунок 3.1

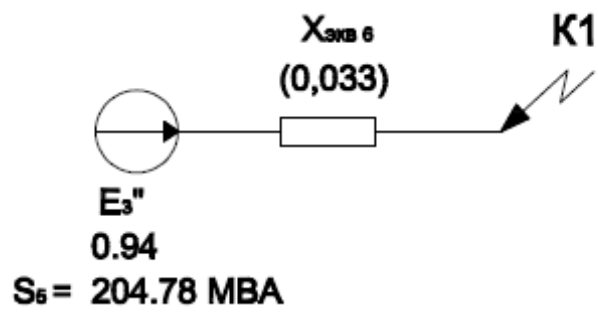


Рисунок 3.2

4 Создание модели в MATLAB

На рисунке 4.1 показана модель ЭС, собранная в программе MATLAB.

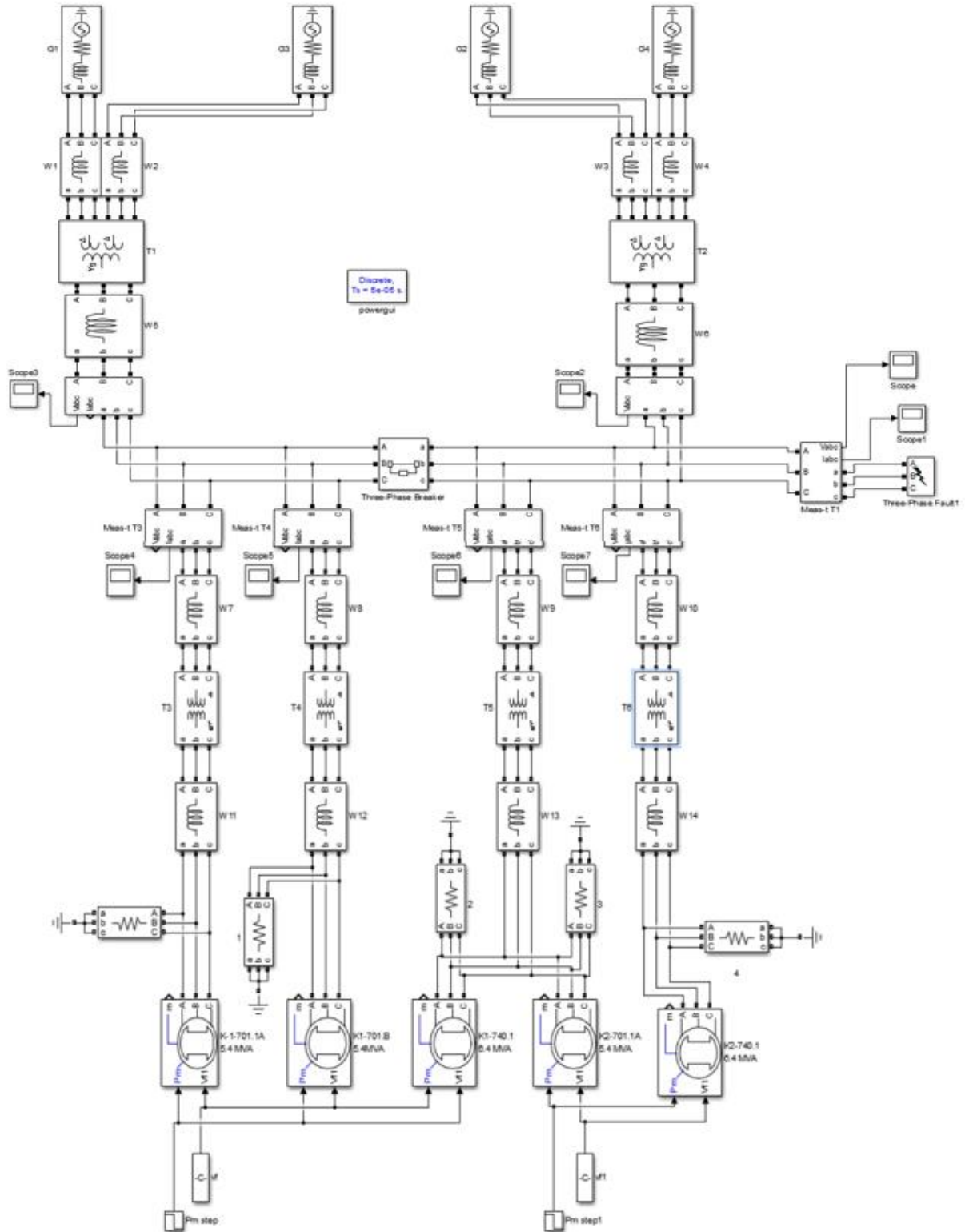


Рисунок 4.1 – Модель ЭС, собранная в MATLAB

4.1 Приведение паспортных данных подсистем в модели MATLAB Simulink требуемой для расчетов. Краткое описание блоков модели Simulink

Основные паспортные данные трансформаторов с расщепленными обмотками, установленных на ЦРП/РУ приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения параметров, включенных в ЕТАР трансформаторов Т5 и Т6

Параметр	Т5	Т6
Номиналы - первичная / вторичная / третичная обмотка (МВА)	80/40/40 (ONAN) 100/50/50 (ONAF)	
Номинальное напряжение обмотки трансформатора - первичная / вторичная / третичная (кВ)	37/10,5/10,5	
Группа соединений трансформатора - первичная / вторичная / третичная обмотка	Yn/d11/ d11 (ток замыкания на землю на обмотке 37 кВ ограничен до 830А)	
Полное сопротивление прямой последовательности (% на основе 80 МВА) - от первичной до вторичной обмотки	27,7	27,7
Полное сопротивление прямой последовательности (% на основе 80 МВА) - от первичной до третичной обмотки	27,8	27,7
Полное сопротивление прямой последовательности (% на основе 80 МВА) - от вторичной до третичной обмотки	48,6	48,6
Коэффициент X/R - от первичной до вторичной обмотки	35	
Коэффициент X/R - от первичной до третичной обмотки	34	
Коэффициент X/R - от вторичной до третичной обмотки	26	
Допустимое отклонение полного сопротивления	0%	
Переключатель ответвлений	Под нагрузкой на обмотке 37 кВ Диапазон +/- 15%, шаг 1,25% 25 положений отпаяк (не оборудованы автоматическим контролем напряжения с SRCS (высоко-инерционная система управления))	
Изменение полного сопротивления при положении отпайки -5%	-1,8%	-1,7%
Изменение полного сопротивления при положении отпайки +5%	2,3%	2,2%

В ходе моделирования сигналов по таблице 15.1 [5] были приведены примерные значения мощности холостого хода – P_{xx} и $P_{кз}$ для параметров реактивной - R_m и индуктивной - L_m составляющих для двух типов трансформаторов на 100 МВА и 50 МВА.

Для Т1-Т2 (100 МВА):

$S_H = 100$ МВА, $U_{BH} = 37$ кВ, $U_{CH} = 11$ кВ, $U_{кз} = 10\%$, $I_{xx} = 1,3\%$, $P_{кз} = 350$ кВт, $P_{xx} = 70$ кВт.

Рассчитанные данные:

$R_m = 1432.9$ Ом, $L_m = 0.426$ Гн, $R1 = 0.005$ Ом, $R2 = 0.0015$ Ом, $L1 = 275e-6$ Гн, $L2 = 82,8e-6$ Гн.

На рисунке 4.2 показаны параметры модели трансформаторов Т1 и Т2.

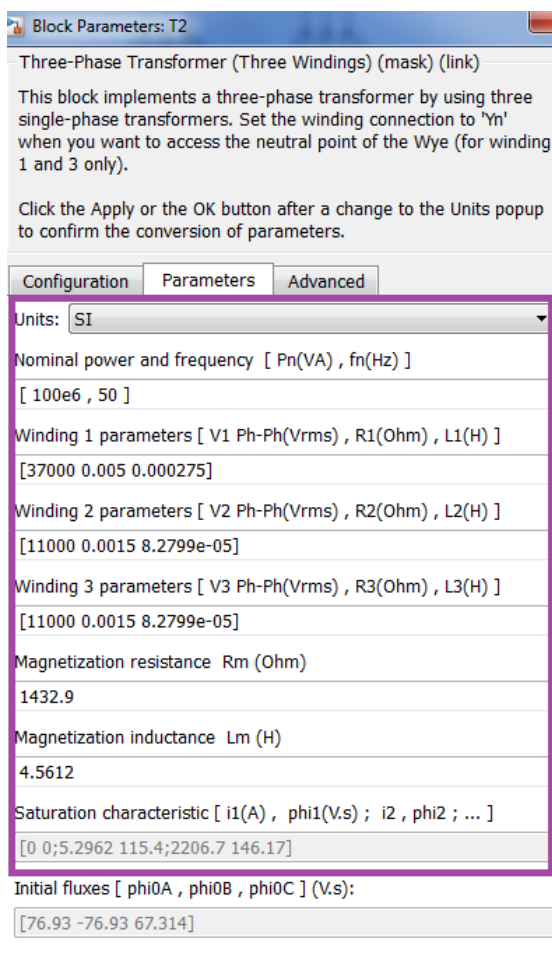


Рисунок 4.2 – Параметры модели трансформаторов Т1 и Т2

Для Т3-Т6 (50 МВА):

$S_H = 50$ МВА, $U_{BH} = 37$ кВ, $U_{CH} = 11$ кВ, $U_{кз} = 10\%$, $I_{xx} = 1,3\%$, $P_{кз} = 350$ кВт, $P_{xx} = 70$ кВт.

Рассчитанные данные:

$R_m=1142.9 \text{ Ом}$, $L_m = 0.98 \text{ Гн}$, $R_1 = 0.005 \text{ Ом}$, $R_2=0.0015 \text{ Ом}$, $L_1 = 275e-6 \text{ Гн}$,
 $L_2=88,6e-6 \text{ Гн}$

На рисунке 4.3 показаны параметры модели трансформаторов Т3 и Т6.

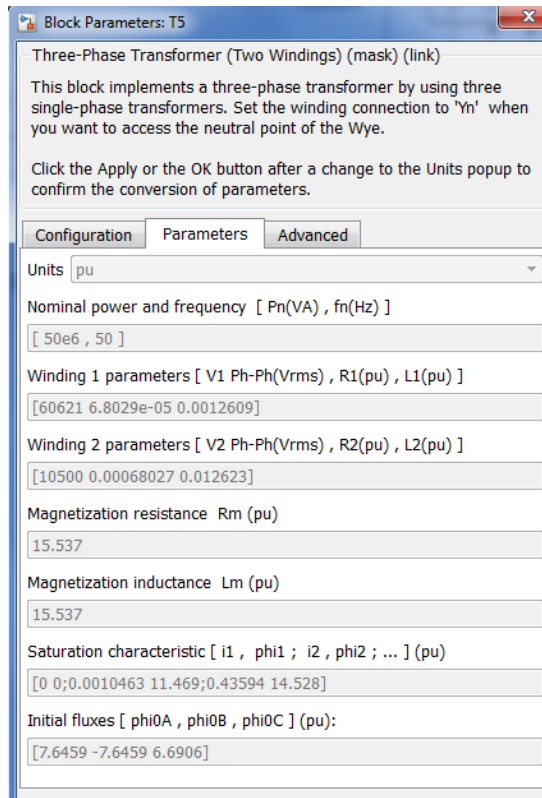


Рисунок 4.3 – Параметры модели трансформаторов Т3 и Т6

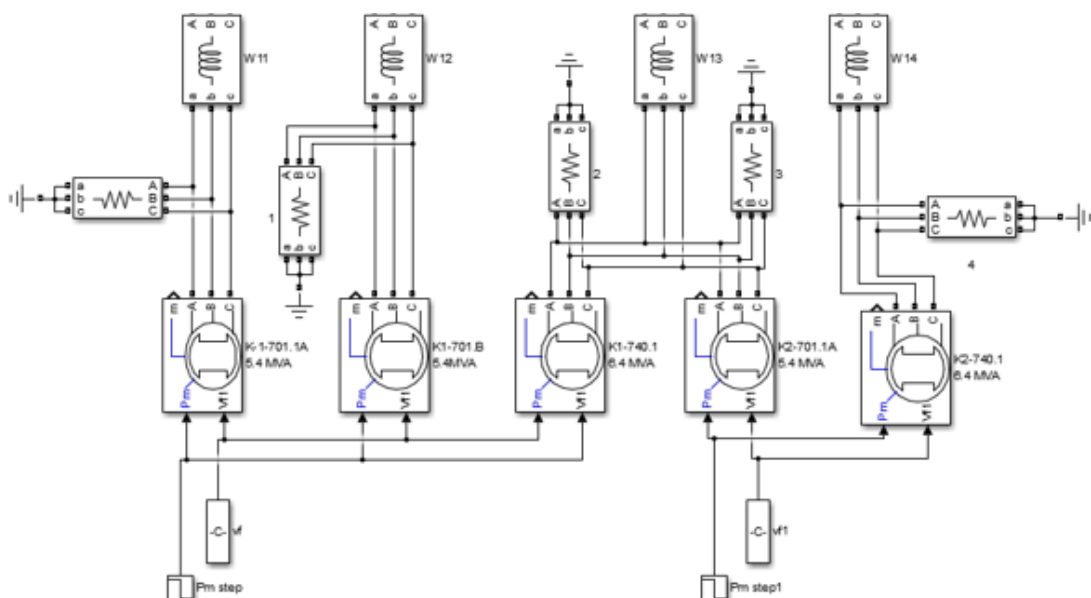


Рисунок 4.4 – Фрагмент модели нагрузок Завода КТЛ-1 и КТЛ-2

Дополнительные параметры системы, а именно нагрузок СД (КТЛ), трансформаторов с расщепленной обмоткой и турбогенераторы были сверены в соответствии с паспортными данными (см. таблицы Б-1, Б-2, приложения Б).

Для симуляции к.з. применяется блок «Three Phase Fault» (рис. 4.5).

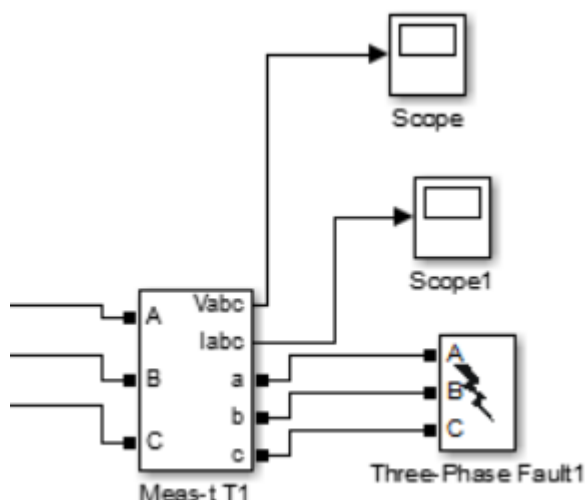


Рисунок 4.5 – Блок симулирования аварийного режима точки КЗ1(3ф).

Scope Vabc – осциллировано амплитуды переходного процесса напряжения фаз А, В, С (3ф) в режиме переходного процесса.

Scope1 Iabc – осциллированы амплитуд переходного процесса тока к.з.

4.2 Симулирование аварийного режима КЗ с графическим воспроизведением амплитудного моделирования

1. *Время имитирования сигнала КЗ:*

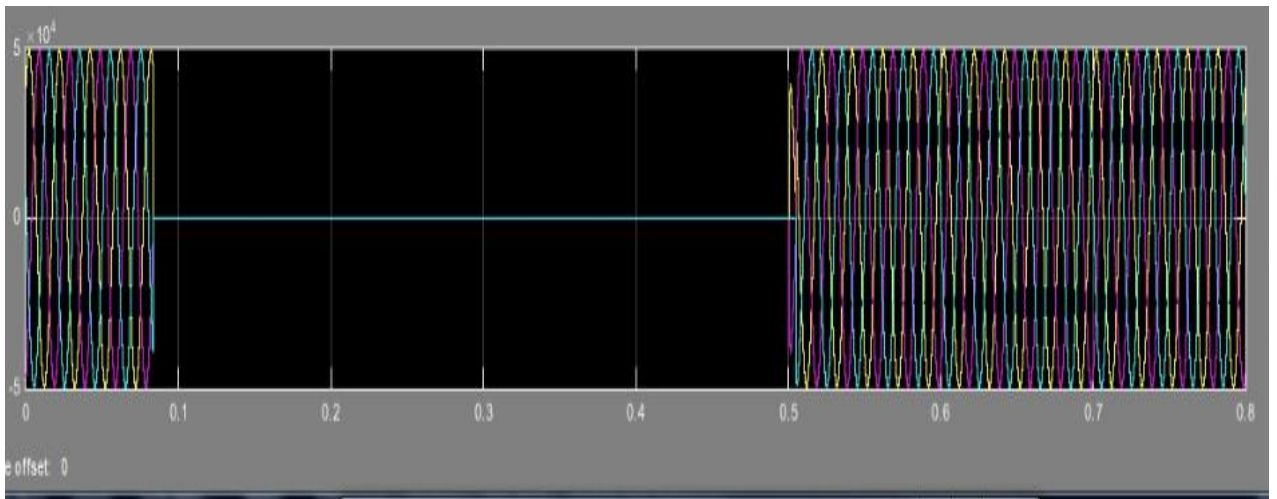
Включение: $t=0.08$ (5/60sec)

Отключение: $t=0.5$ (30/60sec)

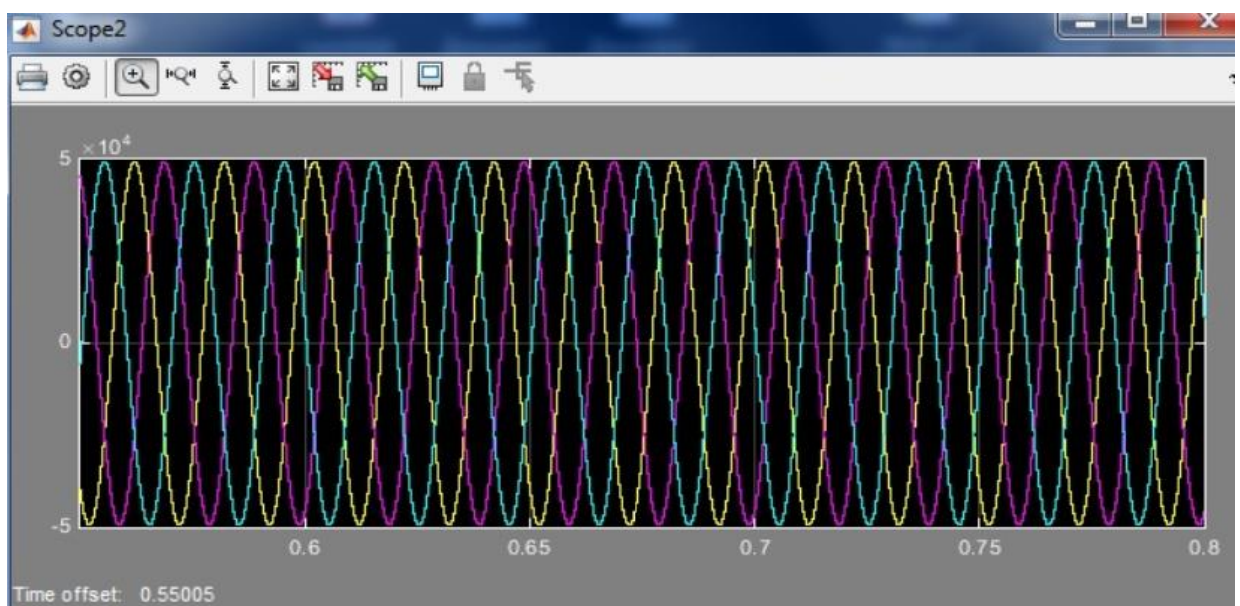
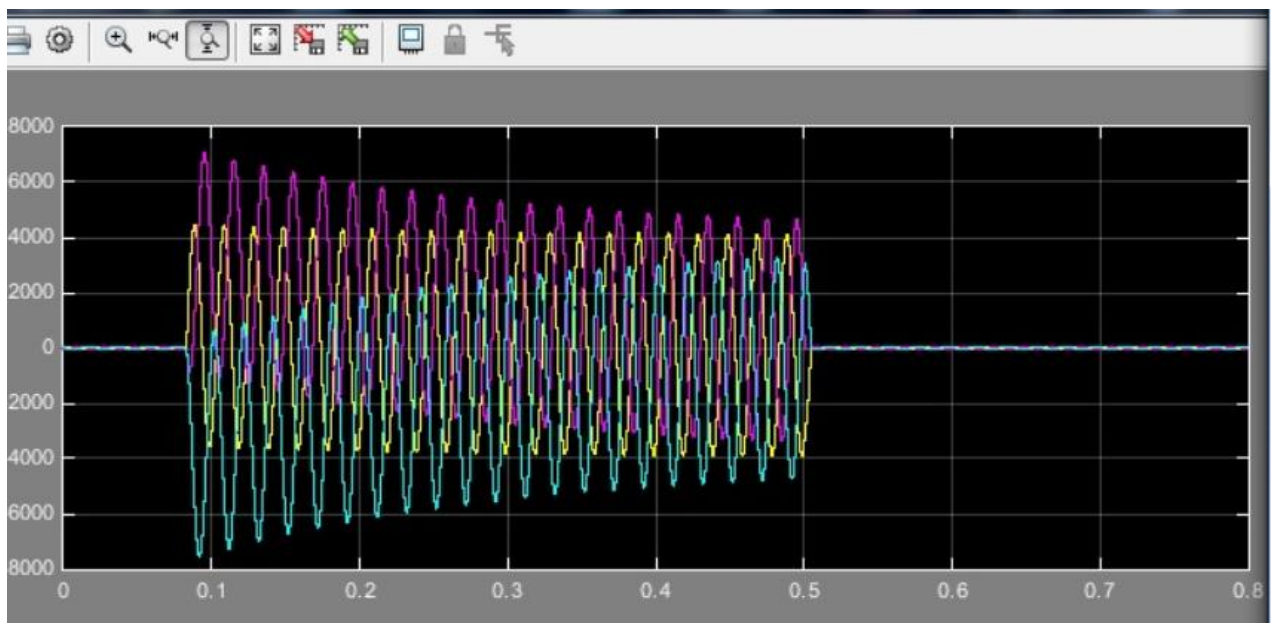
Продолжительность КЗ: $t=0.42$ сек

Амплитуда 3ф напряжения V_m при появлении КЗ в промежутке времени $t=0$

V_m – напряжение $4,94 \cdot 10^{-4} = 49400$ В



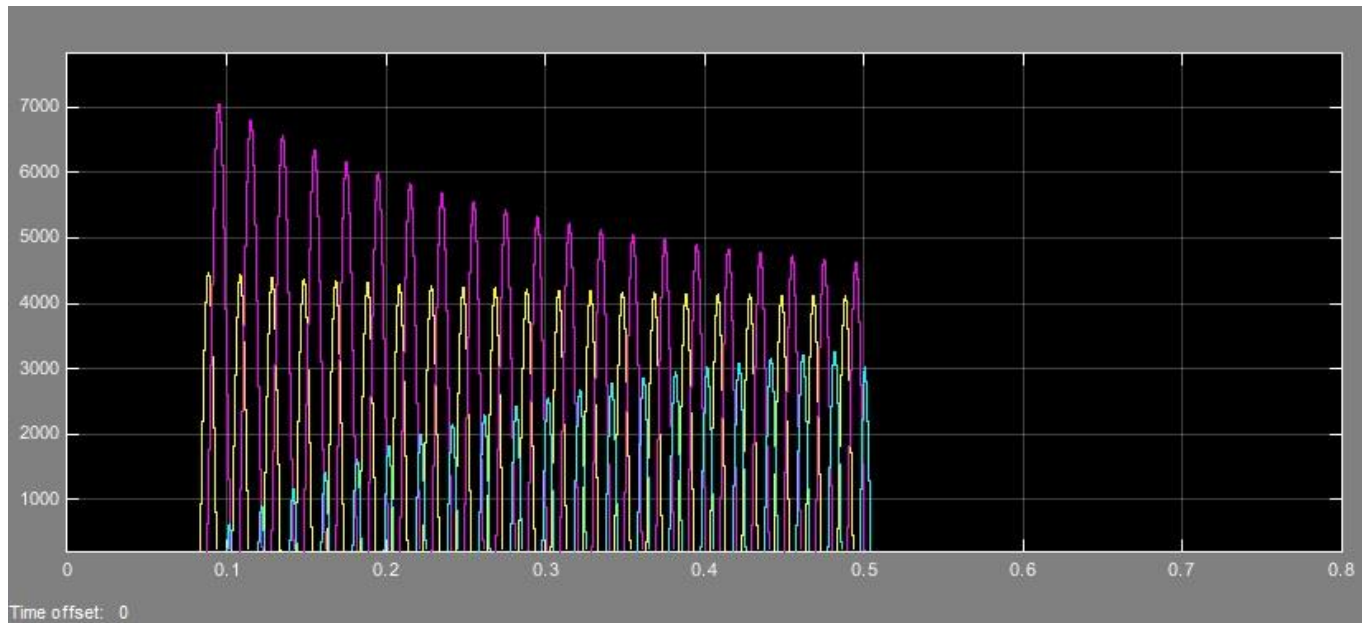
Амплитуды 3ф тока i – в ед. Изм. А ($I_m = 7000$, среднее значение $I_m=5200$)



Амплитуда $V_m = 4,94 \cdot 10^{-4} = 49400$ - 3ф напряжения на ЦРП после КЗ время $t=0.55$

Среднее значение $I_m = 5200$ (Амплитудное $I_{RMS} = I_m/\sqrt{2} = 3676$ А).

Сверхпереходное $I''_m = 7000$ (Амплитудное $I_{RMS} = I_m/\sqrt{2} = 4949$ А).



5 Сопоставление результатов данных аналитического расчета с данными модели. Приведение погрешности

Рассчитаем значение $i_{уд}^{(3)}$:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I'' = \sqrt{2} \cdot 1.92 \cdot 6,949 = 17,54 \text{ кА}$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I'' = \sqrt{2} \cdot 1.92 \cdot 6,949 = 13,52 \text{ кА}$$

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0.01}{\tau_{\square}}} = 1 + e^{-\frac{0.01}{0.111}} = 1.91$$

$$\tau_{\square} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{X}{R} = \frac{1}{314} \cdot 35 = 0.111$$

Приведение результатов	КЗ1 (кА)	Сверх. КЗ, I'', (кА)	$i_{уд}$, (кА)
Метод: аналитического расчета	6.023	6.949	17.54
Симуляция модели MATLAB SimPowerscape	3.676	5.006	13.52

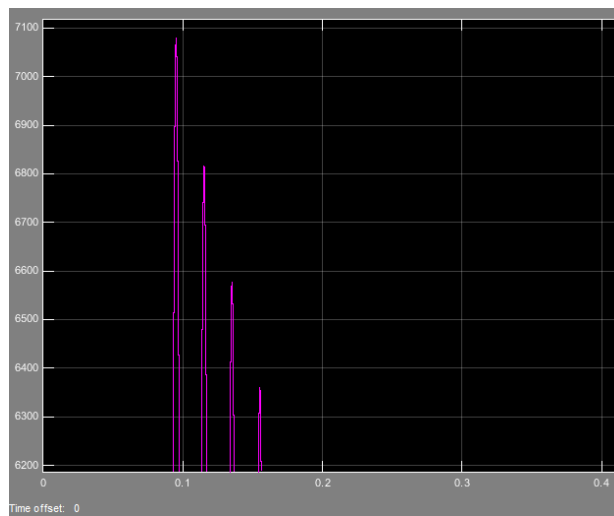


Рисунок 5.1 – Амплитудное значение тока к.з.

В данном сравнении результаты погрешности расчетов при выдаваемых токах КЗ не имеют сильные расхождения. Тем не менее, для расчетного метода в построении модели потребовалось больше специфических данных по параметрам энергооборудований. Оба метода применимы в производстве, но преимущество гибкости и предоставления решений остается за модельным решением испытательного комплекса на базе MATLAB Simulink.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование становится одним из основных инструментов инновационного направления электроэнергетики. Исследование устойчивости энергосистемы в ее разных режимах генерирующего и потребляющего электрооборудования, состояния устройств электрической системы и систем релейной защиты можно проводить сегодня через симуляционные программно-графические решения в реальном времени.

Данное исследование показало, что разработанную модель можно использовать в качестве альтернативного симулятора на производстве для оценки энергоустойчивости систем. Модель дает возможность проводить визуальный анализ переходных процессов симулируя аварийные режимы сети, а также, в дополнении модель может настраиваться согласно устройствам защит путем приведения расчетных показателей токов КЗ с помощью более простых компьютерных испытательных тестов методом вычислительного эксперимента.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ, ТЕРМИНОВ

- ЦРП** - центральная распределительная подстанция
- АРМ** - аварийный резерв мощности
- ПБР** - Проект будущего расширения, в который входит объем работ по ПУУД (Проект управления устьевым давлением)
- ГТЭС** - газотурбинная электростанция
- KEGOC** - «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями» (местный оператор ЕЭС РК, название часто используется в качестве синонима местных электросетей)
- КТЛ** - комплексная технологическая линия
- MATLAB Simulink** - расчетно-программное обеспечение для цифрового моделирования комплексных автоматизированных систем в реальном времени
- РУ** - распределительное устройство
- АВР** - автоматический ввод резерва
- ТШО ТОО** - «Тенгизшевройл», совместное предприятие компаний «КазМунайГаз», «ЛукАрко», «Шеврон» и «Эксон»
- ТГ** - турбинный генератор
- ЗТП** - Завод 3-го поколения
- АФ** - Воздушное принудительное
- ПРОФ** - Проекты развития основных фондов
- АН** - Воздушное естественное
- АВР** - Автоматические регуляторы напряжения
- ЦРП (CDS)** – Центральная распределительная подстанция
- ЕТАР** – Программа анализа мгновенно возникающих неустановившихся токов
- FGP** – Проект будущего расширения (ПБР)
- ГОСТ** - стандарт Республики Казахстан
- GT** - газовая турбина
- ГТГ** – газотурбинный генератор
- NPS** – Новая электростанция
- ONAF** – Масляное естественное воздушное принудительное
- ONAN** - Масляное естественное воздушное естественное
- PF** - Коэффициент мощности
- RMS** - Среднеквадратичное значение
- РК** - Республика Казахстан
- ТШО** - ООО "Тенгизшевройл"

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах
Авторы: С.А. Ульянов
2. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2007. – 45 с.
3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. Учеб. пособие. - Изд. 2-е, испр.
4. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций
Учебник для вузов - 2-е изд. М. Энергоатомиздат, 1986. - 640 с. Главные схемы и схемы собственных нужд, конструкции распреустройств, вспомогательные системы, токи КЗ и их ограничение, параметры и характеристики основного и вспомогательного оборудования, методика выбора электрооборудования.
5. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций.
6. В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (Учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» для профиля подготовки «Электроснабжение»)
7. Electrical Circuit Theory and Technology. Revised second edition. John Bird, BSc(Hons), CEng, MIEE, FIEIE, CMath., FIMA, FCollP. Newnes. OXFORD

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Кривые рабочих характеристик генераторов - ГТГ 6.1 - 6.4

Рисунок 1 отражает кривую фактической мощности предоставленную поставщиком д ГТГ 6.1 6.4.

GENERATOR TYPE TARI 800-26P
RATED MVA 42.663 MVA at 32 deg. C amb.

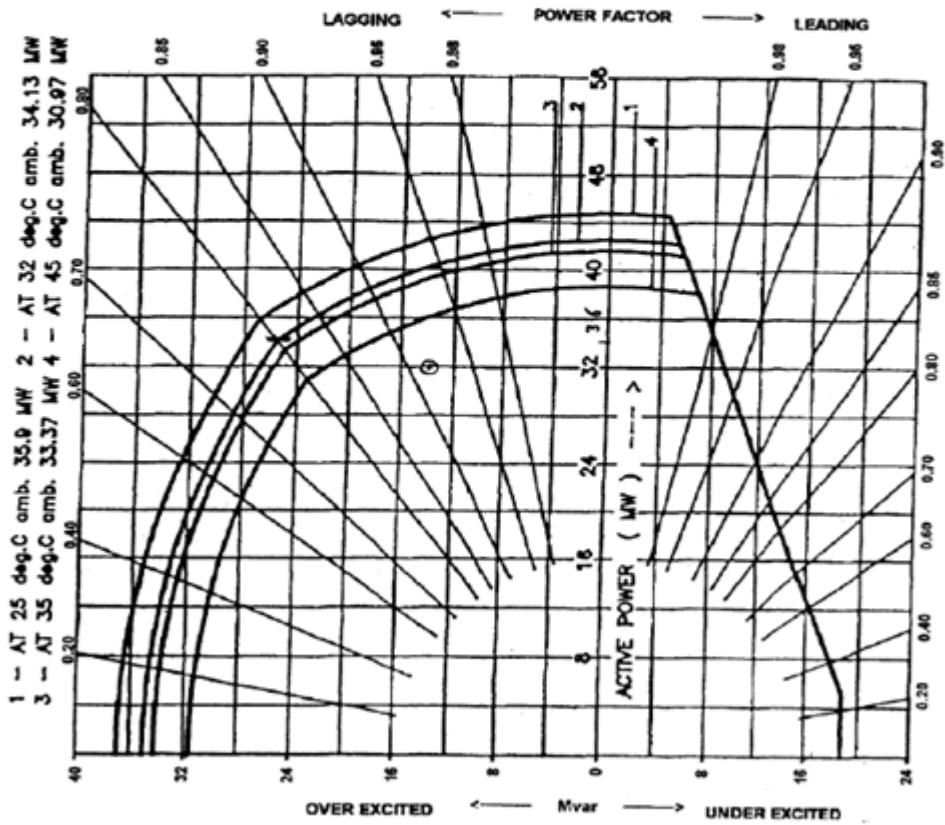


Figure 1: Фактические кривые рабочих характеристик генераторов ГТГ 6.1 - 6.4

Приложение Б

Таблица Б-1

Таблица 64: Данные по существующим мощным синхронным электродвигателям

Номер оборудования	K1 MGC-740.1 (@ KTL1.1)	K1 MGC-701A/B (@ KTL1.1)	K2 MGC-740.1 (@ KTL2.1)	K2 MGC-701 (@ KTL2.1)	K2.3 MGC-740.3 (@ KTL2.3)	K2.3 MGC-701.4 (@ KTL2.3)
Паспортные данные						
Изготовитель	GARBE- LAHMEYER	SCHORCH	JEUMONT- SCHNEIDER	SCHORCH	JEUMONT- SCHNEIDER	SCHORCH
Номинальная мощность (кВт)*	6400	5400	6400	5400	6400	5400
Трансмиссионный вал (кВт) *	5775	4854	5660	4854	5660	4854
Напряжение агрегата (кВ)*	10	10	10	10	10	10
Частота (Гц)	50	50	50	50	50	50
Номинальный коэффициент мощности (%)*	85	78	85	78	85	78
Коэффициент мощности (% при полной нагрузке)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)
Коэффициент мощности (% при нагрузке 75%)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)
Коэффициент мощности (% при нагрузке 50%)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)
Коэффициент мощности (% в рабочем режиме)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)	100 (Прим. 6)
Номинальная производительность	97,4	97,1	97,5	97,1	97,5	97,1
Производительность (% при 100% нагрузке)	97,4	97,1	97,5	97,1	97,5	97,1
Производительность (% при 75% нагрузке)	97,0	96,7	97,3	96,7	97,3	96,7
Производительность (% при 50% нагрузке)	96,0	95,6	96,9	95,6	96,9	95,6
Кол-во столбов *	4	4	4	4	4	4
Экспл. коэфф. (SF)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Ток при полной нагрузке (амперы)***	446,3	411,6	445,9	411,6	445,9	411,6
Данные модели						
Динамическая модель **	Сверхперех.	Сверхперех.	Сверхперех.	Сверхперех.	Сверхперех.	Сверхперех.
Базовая нагрузка электродвигателя (МВА) ***	7,73	7,13	7,72	7,13	7,72	7,13
Кривая насыщения представлена	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Коэффициент насыщения при напряжении 100% (S100) **	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Коэффициент насыщения при напряжении 120% (S120) **	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
Коэффициент затухания (D) **	2	2	2	2	2	2

Таблица Б-2

Номер оборудования	K1 MGC-740.1 (@ KTL1.1)	K1 MGC-701A/B (@ KTL1.1)	K2 MGC-740.1 (@ KTL2.1)	K2 MGC-701 (@ KTL2.1)	K2.3 MGC-740.3 (@ KTL2.3)	K2.3 MGC-701.4 (@ KTL2.3)
Тип ротора **	Цилиндр. ротор	Цилиндр. ротор	Цилиндр. ротор	Цилиндр. ротор	Цилиндр. ротор	Цилиндр. ротор
Реактивное сопротивление (%)						
Номинальное сверхпереходное синхронное реактивное сопротивление по продольной оси (X_d') *	14	11	19	11	19	11
Соотношение X/R (X'/R_a) **	35	35	35	35	35	35
Номинальная нулевая последовательность Реактивное сопротивление (X_0) **	15,38	15,38	15,38	15,38	15,38	15,38
Номинальная негативная последовательность Реактивное сопротивление (X_2) **	15,38	15,38	15,38	15,38	15,38	15,38
Номинальное синхронное реактивное сопротивление по продольной оси (X_d) *	222	192	243	192	243	192
Номинальное переходное синхронное реактивное сопротивление по продольной оси (X_d') *	27	24	30	24	30	24
Номинальное индуктивное сопротивление рассеяния цепи якоря (X_L) **	11	11	11	11	11	11
Номинальное синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (X_q) **	108	108	108	108	108	108
Номинальное переходное синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (X_q) **	23	23	23	23	23	23
Номинальное сверхпереходное синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (X_q) **	12	12	12	12	12	12
Постоянная времени при разомкнутой обмотке якоря (сек)						
Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря (T_{do}') **	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря (T_{do}'') ** (прим. 9)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Переходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке якоря (T_{qo}') **	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке якоря (T_{qo}'') ** (прим. 9)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Данные модели заторможенного ротора						
Коэффициент тока при блокировке ротора (% ТБР) *	790	800	790	800	790	800
Коэффициент мощности при заторможенном роторе (%PF)	26	30	26	30	26	30
Тип модели	СКТ (Прим. 1)	отсутствует	СКТ (Прим. 1)	отсутствует	СКТ (Прим. 1)	отсутствует